

Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD MÁQUINAS Y ESTRUCTURAS

RESUMEN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

**"ANÁLISIS DEL DEGASTE DE LA
HERRAMIENTA AL MECANIZAR POLÍREMOS
REFORZADOS CON FIBRA"**

*("Analysis of tool wear after machining of
Fibre Reinforced Polymers")*

REALIZADO EN
Universidad Tecnológica de Viena



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

AUTOR:	JAVIER TURRILLO JIMENO
TUTOR UC3M:	JORGE LÓPEZ PUENTE
TUTOR TU WIEN:	RICHARD ZEMANN

JULIO 2012

Índice

Índice	1
Índice de figuras	2
Índice de tablas.....	2
1. Introducción y objetivos.....	1
2. Polímeros Reforzados por Fibra (FRPs)	2
3. Maquinabilidad.....	3
4. Desgaste de la herramienta.....	4
5. Trabajo experimental	5
5.1. Herramienta	5
5.2. Material de las muestras: AFRP	5
5.3. Máquinas e instrumentación	6
5.4. Proceso de mecanizado y puesta a punto	7
6. Mejoras del proceso y futuros desarrollos	8
7. Conclusiones	9

Índice de figuras

Figura 1: Diferentes tipos de delaminación.	3
Figura 2: Desgaste abrasivo, adhesivo, difusivo, por oxidación y fatiga respectivamente.	4
Figura 3: Herramienta utilizada para el taladrado de aramida.	5
Figura 4: Centro de mecanizado <i>Haas VF-3SSHE</i> .	6
Figura 5: <i>Alicona IF-Edgemaster</i> .	6
Figura 6: Sistema de adquisición de datos.	7
Figura 7: Elementos del sistema y sistema de referencia.	7
Figura 8: Muestra 1 - F_x , F_y y F_z .	9
Figura 9: Muestra 1 - Áreas.	9
Figura 10: Áreas en la herramienta.	10
Figura 11: Viruta adherida a la herramienta.	10
Figura 12: Evolución de F_z .	10
Figura 13: Acabado de la superficie del segundo taladro.	11
Figura 14: Radio vs. F_z .	12
Figura 15: Comparación del desgaste del filo principal entre las muestras 1 y 45.	12

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros usados para los ensayos.	5
Tabla 2: Propiedades de la fibra de aramida.	5
Tabla 3: Propiedades del prepeg.	5
Tabla 4: Radio de los filos de la herramienta.	11
Tabla 5: Delaminación de la lámina inferior en las muestras 6, 25 y 45.	12

1. Introducción y objetivos

Los Polímeros Reforzados con Fibra (FRP) son materiales caracterizados por su ligereza comparados con los metales, sin embargo su resistencia y rigidez específica es superior debido al refuerzo de fibra. Además en la mayoría de los casos presentan una mejor resistencia a la fatiga y corrosión, aislamiento térmico, conductividad y aislamiento acústico que los metales. Debido a estas propiedades los FRPs han cobrado relevancia en los últimos años en todo tipo de sectores tales como el aeroespacial, aeronáutico, automovilístico, náutico y deportivo.

Los FRPs son manufacturados con una forma muy próxima a la final, aunque posteriormente se suelen requerir operaciones de mecanizado, no siendo sencillo debido a al complejo comportamiento de estos materiales. El elevado precio de los materiales junto con la elevada destreza requerida para su mecanización resultan en elevados costes y baja productividad, por lo que el análisis de las herramientas al mecanizar los FRPs es un tema de gran relevancia para comprender su comportamiento y por tanto los factores que son determinantes, para de este modo conseguir la reducción de costes que demanda la industria. Para ello se requiere comprender:

- Qué son los FRPs, cuáles son sus propiedades y de qué dependen.
- Qué es la maquinabilidad.
- Operaciones de mecanizado habituales en FRPs.
- Factores que influyen en la calidad del acabado.
- Desgaste de las herramientas y factores involucrados.
- Desgaste de la herramienta al mecanizar FRPs.

Por tanto, se llevará a cabo un análisis del desgaste de las herramientas para evaluar los factores de mayor relevancia, ya que una mejor comprensión de ello permitirá un mejor acabado, una mayor vida útil de la herramienta y por tanto un incremento en la productividad y una disminución de costes. Para alcanzar estos objetivos se procederá al taladrado de muestras de Polímero Reforzados con Fibra de Aramida (AFRP).

2. Polímeros Reforzados por Fibra (FRPs)

Para comprender el desgaste de la herramienta no sólo las propiedades de dicha herramienta son importantes, también las del material que se va a mecanizar, ya que el desgaste se encuentra relacionado con la interacción entre superficies. Por tanto una mejor comprensión de las propiedades y el comportamiento del material que va a ser mecanizado resultará en un mejor análisis de los factores involucrados en el desgaste de la herramienta.

Los materiales compuestos están formados por una mezcla de dos o más constituyentes o fases presentes en proporciones razonables, distinguibles físicamente y separables químicamente, separados por una interfase y siendo las propiedades del material compuesto superiores a la de cada uno de los compuestos por separado. El constituyente continuo y presente en mayor cantidad es la matriz, siendo su principal cometido proteger y dar cohesión al material, distribuyendo los esfuerzos al agente reforzante. El segundo constituyente es el agente reforzante y es el encargado principal de soportar los esfuerzos, siendo su forma, volumen y disposición en la matriz responsables de las propiedades del compuesto. El refuerzo se puede presentar en forma de fibras largas, fibras cortas o partículas.

Entre las ventajas de los materiales compuestos respecto a los metales destacan su resistencia y rigidez específica, resistencia a la corrosión y fatiga, aislamiento térmico y aislamiento acústico. El principal inconveniente de estos materiales es el alto coste de fabricación respecto a los metales, debido alto precio de los constituyentes, mano de obra especializada y la carencia de métodos de producción de alta productividad. Por otro lado, al tratarse de materiales relativamente nuevos existe también una carencia de bases de datos fiables sobre sus propiedades, así como de métodos sencillos para el análisis de herramientas.

Los Polímeros Reforzados por Fibra (FRPs) son materiales compuestos cuya matriz se encuentra constituida por un polímero. Éstos son ampliamente usados debido al amplio abanico de propiedades resultante de su configuración molecular, bajo precio y facilidad de procesado. Se distinguen dos tipos de matriz polimérica: polimérica o termoplástica. Por ello habrá que considerar tanto la temperatura de transición vítrea como la de fusión de cara a la maquinabilidad y a las temperaturas de funcionamiento del material. Los FRPs normalmente se refuerzan con fibras de:

- Vidrio (GFRP): ampliamente usada debido a su bajo coste, resistencia a la corrosión, relativamente baja rigidez, moderada resistencia y bajo peso. Por contra su resistencia a fatiga es baja y se degradan rápidamente bajo humedad. Además es un material altamente abrasivo, lo cual supone un problema de cara a su mecanización.
- Aramida (AFRP): son fibras orgánicas manufacturadas de poliamida aromática. Ofrecen una mayor resistencia y rigidez que las de vidrio, además de una mayor dureza y tolerancia al daño, tendiendo a doblarse en vez de ser cortadas cuando se mecanizan por lo que requieren de herramientas y técnicas especiales.
- Carbono (CFRP): ofrece rigidez y resistencia combinada con una baja densidad y un precio moderado. Además ofrecen un coeficiente de expansión térmica negativo en dirección longitudinal de la fibra. Cabe destacar que durante su mecanización se genera polvo altamente abrasivo que puede causar el desgaste de elementos de la máquina.

3. Maquinabilidad

La maquinabilidad de este tipo de materiales viene determinada por las propiedades de la matriz y el contenido y orientación de las fibras. Las fibras de carbono y de vidrio bajo esfuerzos críticos se rompen produciendo residuos abrasivos que producen el desgaste acelerado del filo de la herramienta. La aramida por contra es más dura siendo más difícil su corte, por lo que tienden a doblarse.

Por otra parte, el valor de las fuerzas alcanzadas durante la mecanización depende en gran medida de la orientación de las fibras y de la geometría de la herramienta. La fuerza de corte es mayor cuando el ángulo entre la fuerza y la fibra es de 90° , siendo 45° para la fuerza de empuje. Un incremento en los ángulos de incidencia y desprendimiento generalmente lleva a una disminución de la fuerza, mientras que el efecto del radio de filo está relacionado con la profundidad de corte, siendo proporcional a ello.

La calidad del mecanizado de FRPs se encuentra asociada principalmente con la delaminación (Fig. 1), el desgaste de la herramienta, la temperatura de corte y en menor medida con la profundidad de corte y la orientación de las capas. La delaminación puede evitarse reduciendo las fuerzas implicadas en el proceso, lo cual equivale a una reducción de la sección de viruta mediante la reducción de velocidad de corte y el avance.

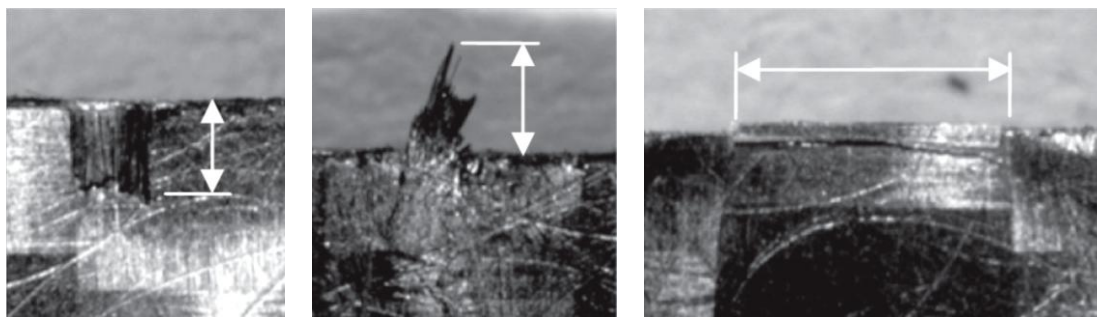


Figura 1: Diferentes tipos de delaminación.

A parte de la delaminación, otros daños típicos son el astillado de la matriz, rotura de fibras, fibras no cortadas y grietas. Por otro lado la temperatura cobra relevancia cuando esta es elevada, ya que afecta a la matriz pudiendo aparecer además tensiones residuales debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica de la matriz y la fibra.

Finalmente, los parámetros de la rugosidad de la superficie, usados a menudo para la caracterización de las superficies mecanizadas y para la descripción de la morfología superficial, al ser usados con FRPs revelan poco acerca de las verdaderas características de los compuestos. Por ello estos parámetros se utilizan a menudo en combinación con la inspección visual, para poder de este modo revelar características superficiales tales como manchas en la matriz, fibras arrancadas o delaminación.

4. Desgaste de la herramienta

En todos los procesos de mecanizado la herramienta de corte sufre desgaste. Éste puede ser de tipo abrasivo, adhesivo, difusivo, por oxidación o por fatiga (Fig. 2).

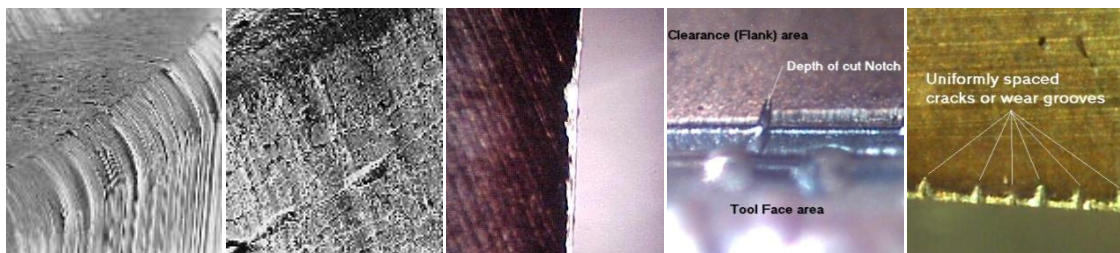


Figura 2: Desgaste abrasivo, adhesivo, difusivo, por oxidación y fatiga respectivamente.

Bajo diferentes condiciones de mecanizado los mecanismos de desgaste varían. Para determinadas combinaciones de herramienta y material a mecanizar, el mecanismo dominante varía con la temperatura. De acuerdo con la distribución de temperatura en la herramienta el desgaste de cráter es principalmente causado por abrasión, difusión y oxidación, mientras que para el desgaste de flanco la abrasión es el mecanismo predominante. Entre los efectos del desgaste destacan:

- Disminución de la precisión dimensional.
- Incremento de la rugosidad superficial.
- Incremento de la temperatura debido al aumento de la fricción.
- Generación de vibraciones debido a la inestabilidad dinámica de la herramienta.
- Influencia sobre las fuerzas de corte, aumentando de manera general las fuerzas al aumentar el desgaste.
- Disminución de la productividad y calidad del componente, incrementando de este modo los costes.

El desgaste de la herramienta se encuentra altamente relacionado con el tipo, orientación y fracción volumétrica de las fibras. Por ejemplo, las fibras de carbono poseen una alta conductividad térmica que favorecen la disipación de calor, reduciendo de este modo la temperatura del filo de corte y por tanto su desgaste. La orientación de la fibra puede causar la recuperación elástica de la fibra después de su corte, dando lugar a un mayor desgaste. Por último, la fracción volumétrica se encuentra relacionada con el área de material en contacto con la herramienta. Por otra parte, el desgaste de la herramienta se encuentra también altamente relacionado con los parámetros del proceso de mecanizado. El desgaste disminuye al disminuir la sección de viruta, lo cual se consigue reduciendo la velocidad de corte y el avance.

Los principales tipos de desgaste en la mecanización de los FRPs son el picado en materiales frágiles (PCD y PCBN), adhesión, oxidación y principalmente abrasión. La abrasión se muestra en el redondeo del filo de corte, proviniendo de la abrasividad de las fibras, restos de viruta y microastillado debido a la heterogeneidad del material. Por lo tanto para la mecanización de FRPs se requieren materiales de alta dureza para la abrasión, alta tenacidad y buena conductividad térmica para la disipación del calor.

5. Trabajo experimental

En esta sección se presenta toda la información concerniente al mecanizado de las muestras de aramida (AFRP) para su posterior análisis. Ello incluye una descripción de la herramienta, material de las muestras, maquinaria, instrumentación y del proceso en sí mismo.

5.1. Herramienta

La herramienta utilizada es una fresa "Solid carbide slot drill 6 mm GARANT" (Fig. 3), de alto rendimiento con una geometría que evita la delaminación del material compuesto. Se puede utilizar en seco o con aplicación de aire comprimido.



Figura 3: Herramienta utilizada para el taladrado de aramida.

La elección de esta herramienta se debe a que es una de las pocas que son específicas para la mecanización de aramida. El valor de los parámetros que se utilizarán para los ensayos se presentan la siguiente tabla (Tabla 1).

v_c [m/min]	110
f [mm/rev]	0.08

Tabla 1: Parámetros usados para los ensayos.

5.2. Material de las muestras: AFRP

Las muestras de aramida se componen de varios elementos:

- **Fibra:** la fibra de aramida utilizada es *Teijin Twaron*, que ofrece un buen equilibrio entre propiedades mecánicas, resistencia química y estabilidad térmica (Tabla 2).

Densidad (g/cm ³)	Resistencia a tracción (GPa)	Mód. elasticidad (GPa)	Humedad (wt%)	Tg (°C)	Descomposición (°C)
1.44-1.45	2.4-3.6	60-120	3.2-5	-	500

Tabla 2: Propiedades de la fibra de aramida.

- **Prepeg:** el preimpregnado es de *SGL Group*, aportando máximo rendimiento combinado con el mínimo peso (Tabla 3).

Sistema	Tipo	Tg (°C)	Temp. de curado (°C)	Área-Masa (g/m ²)
E 201	Epoxy	100 °C	90 - 140	445

Tabla 3: Propiedades del prepeg.

La disposición de las capas es 0/+45/0, obteniendo una muestra de 29 capas de 1200x1200 mm² y 6 mm de espesor, la cual posteriormente ha sido cortada en muestras de 100x100 mm² para los ensayos.

5.3. Máquinas e instrumentación

Los elementos utilizados durante los ensayos se detallan a continuación:

- **Taladrado:** para la mecanización se ha utilizado un centro de mecanizado *Haas VF-3SSHE* (Fig. 4) de cuatro ejes y potencia máxima del huso 22,4 kW.



Figura 4: Centro de mecanizado *Haas VF-3SSHE*.

- **Medición**
 - **Fuerza y par**

Para la medición de la fuerza y el par durante el mecanizado de las muestras se utilizó el dispositivo *Kistler 9129AA* en la base donde la muestra se fija. Éste dinamómetro mide las fuerzas de reacción de la herramienta a través de la pieza mecanizada. Además se ha utilizado un amplificador de 8 canales *Kistler 5070A2100*, conectado a un dispositivo de adquisición de datos *NI USB-6229 Multifunction* y software desarrollado con *NI LabVIEW*.

- **Desgaste**

Por otra parte, para el análisis del desgaste ha sido necesaria la medición de los filos de la herramienta. Para este fin se ha utilizado el dispositivo de medición 3D *Alicona IF-Edgemaster* (Fig. 5).

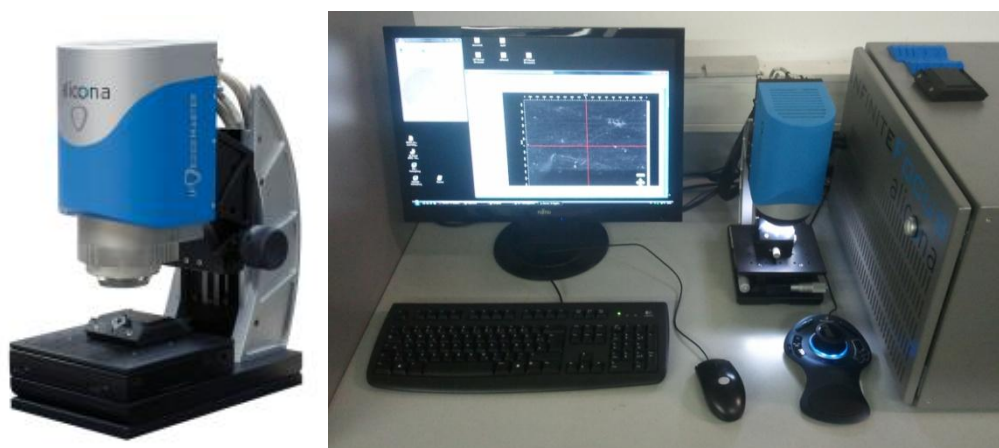


Figura 5: *Alicona IF-Edgemaster*.

- **Preset de la herramienta**

Para la medida y ajuste de la herramienta de cara a su posterior uso en el centro de mecanizado, se ha recurrido al dispositivo *Zoller Verturion 600*.

5.4. Proceso de mecanizado y puesta a punto

El proceso seguido para la preparación del equipamiento necesario se detalla a continuación:

1. Colocación del dinamómetro en el centro de mecanizado y conexión de los dispositivos necesarios para la adquisición de datos y su tratamiento (Fig. 6).

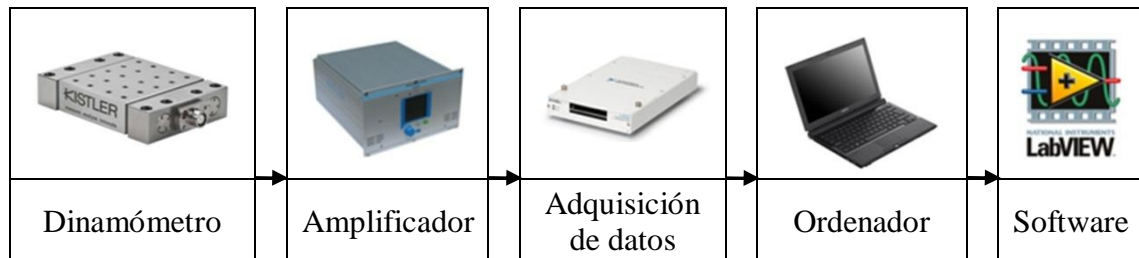


Figura 6: Sistema de adquisición de datos.

2. Medición y compensación de la herramienta mediante el *Zoller Verturion 600*.
3. Fijación de la muestra a ser mecanizada.
4. Acoplamiento del sistema de succión, ya que las fibras de aramida se pueden romper formando diámetros de fibra dentro del rango respirable, siendo además recomendable el uso de máscara. En la siguiente figura se muestran los diversos elementos involucrados en el proceso así como el sistema referencia utilizado (Fig. 7).

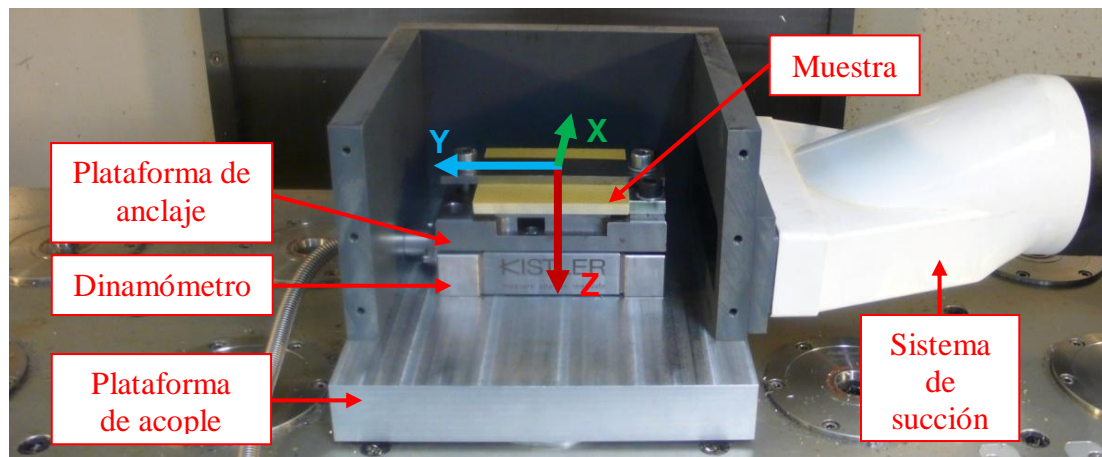


Figura 7: Elementos del sistema y sistema de referencia.

5. Montaje de la tapa para mejorar la succión del sistema.
6. Mecanizado: taladrado de los cuatro agujeros.
7. Retirar la tapa y quitar la muestra mecanizada.
8. Si otra muestra tiene que ser mecanizada, fijarla a la plataforma de anclaje y volver a colocar la tapa.
9. Además, cada vez que la herramienta se extraiga del centro de mecanizado para la medición del desgaste deberá ser recalibrada con la ayuda del *Zoller Verturion 600* para compensar su longitud en el centro de mecanizado.

6. Mejoras del proceso y futuros desarrollos

Se ha comprobado que el atasco de las virutas en la herramienta resulta en un incremento de la fuerza requerida para el mecanizado. Ello se debe a que la capacidad de la herramienta para la evacuación de la viruta no es elevada y al reblandecimiento de la matriz. Además en el segundo taladro de cada muestra, la insuficiencia de succión ha agravado este problema, generando fuerzas de compresión que han resultado en el daño de la superficie. Por tanto, el uso de aire comprimido (permitido para la herramienta) y el ajuste de los parámetros del procesos para reducir el espesor de viruta equivalente (aumentar la velocidad de corte y disminuir el avance), deberían ayudar a reducir el atasco de viruta y conseguir mejor calidad de acabado. La mejora del sistema de succión sería otra alternativa a dicho problema, aunque el uso de aire comprimido es más recomendable. Otra posible mejora orientada a reducir los problemas del primer taladro sería la implementación de un sistema continuo del proceso o calentar la herramienta mientras se cambia la muestra a mecanizar, con el objetivo de evitar el enfriamiento y adhesión del material a la herramienta.

Otro problema que se ha encontrado es la delaminación de la lámina inferior, causada por la punta de la herramienta al generar fuerzas de compresión sobre las capas aún sin mecanizar, las cuales se deforman elásticamente hasta que finalmente se rompen. Este problema se puede reducir disminuyendo la velocidad de corte y el avance. Otras soluciones, sin considerar los parámetros del proceso, son incrementar el espesor de la última lámina y usar un plato de soporte adecuado. El uso de una broca helicoidal de doble hélice es recomendable para reducir la delaminación, ya que las dos hélices opuestas generan fuerzas que actúan en compresión desde ambos lados de la lámina

Debido a la naturaleza de las fibras de aramida, se ha encontrado una baja calidad de acabado en el borde del taladro. Ésta puede verse mejorada utilizando agujeros piloto o brocas de diámetro variable para reducir la fuerza, o finalmente taladrar hasta la mitad del espesor de la muestra desde ambos lados, quitando posteriormente el sobrante que esta operación deja en el centro del taladro.

Si lo que se requiere es un balance entre rapidez y acabado, sin tener en cuenta el desgaste de la herramienta, la velocidad de corte y avance deben incrementarse, disminuyendo el avance en la entrada y salida para obtener un mejor acabado. Por otro lado, la posibilidad de disponer en paralelo varias muestras, taladrando todas en una única operación, debe ser analizada.

Si el interés recae sobre el desgaste el avance debe reducirse, así como el ángulo y radio de punta de la broca que contribuyen de manera significativa a la fuerza. Además es aconsejable el uso herramientas de alta conductividad térmica tales como las brocas de PCD.

Finalmente se proponen las líneas de futuro desarrollo:

- Continuar realizando ensayos hasta que se pueda realizar un completo análisis del desgaste.
- Medida de la temperatura durante el proceso para analizar su influencia en la matriz y la herramienta.
- Analizar la relevancia de la fuerza correspondiente al movimiento a lo largo del eje x , ya que ello podría ser un factor determinante en operaciones de fresado.
- Mecanizar compuestos laminados unidireccionales para comprender mejor su comportamiento y de este modo extrapolarlo a los multilaminados.

7. Conclusiones

Primero se llevo a cabo un análisis del patrón del proceso al mecanizar los cuatro taladros de cada muestra. Los valores de fuerza más elevados se encontraron en la dirección del eje z ya que se trata de una operación de taladrado. Se identificó de manera clara cada uno de los cuatro taladros (Fig. 8). Se observó que el momento generado en dirección z durante el mecanizado no era constante como se esperaba, lo cual puede deberse a la presencia de elementos elásticos en el sistema.

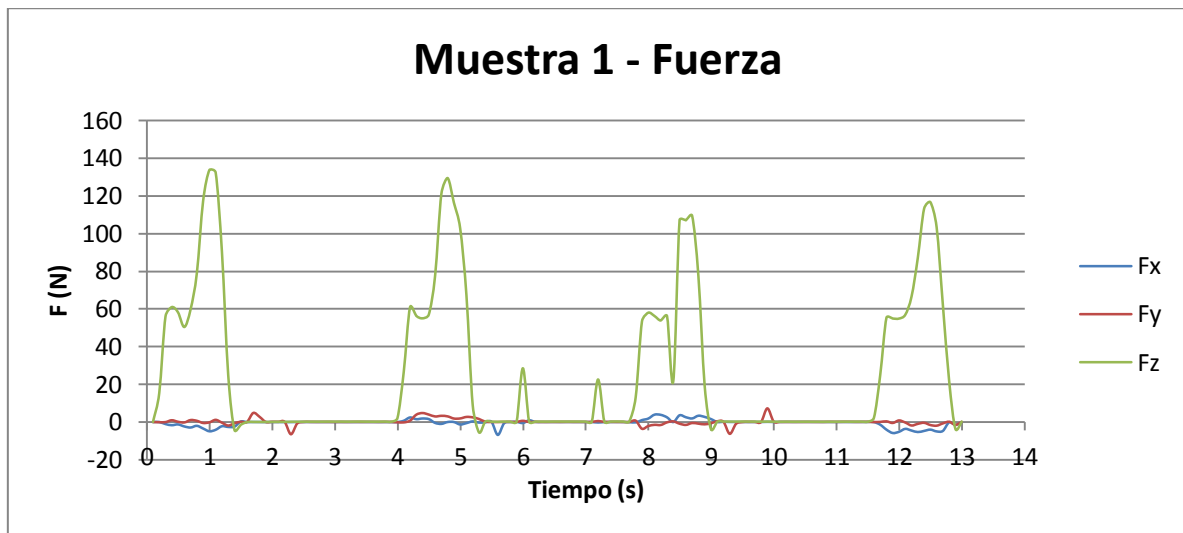


Figura 8: Muestra 1 - F_x , F_y y F_z .

Se analizó la relación entre la fuerza requerida para el mecanizado y la parte de la herramienta que se encontraba implicada en cada momento, identificándose cinco áreas diferentes (Fig. 9 y 10): área I en la que comenzaba el taladrado, II en la que la fuerza se mantenía constante, III en la que aumentaba la fuerza requerida, IV disminución de la fuerza y V valores negativos. Se observó que la delaminación acompañada del atascamiento de las virutas en la herramienta se oponían al retroceso de la herramienta una vez finalizado el taladrado (área V).

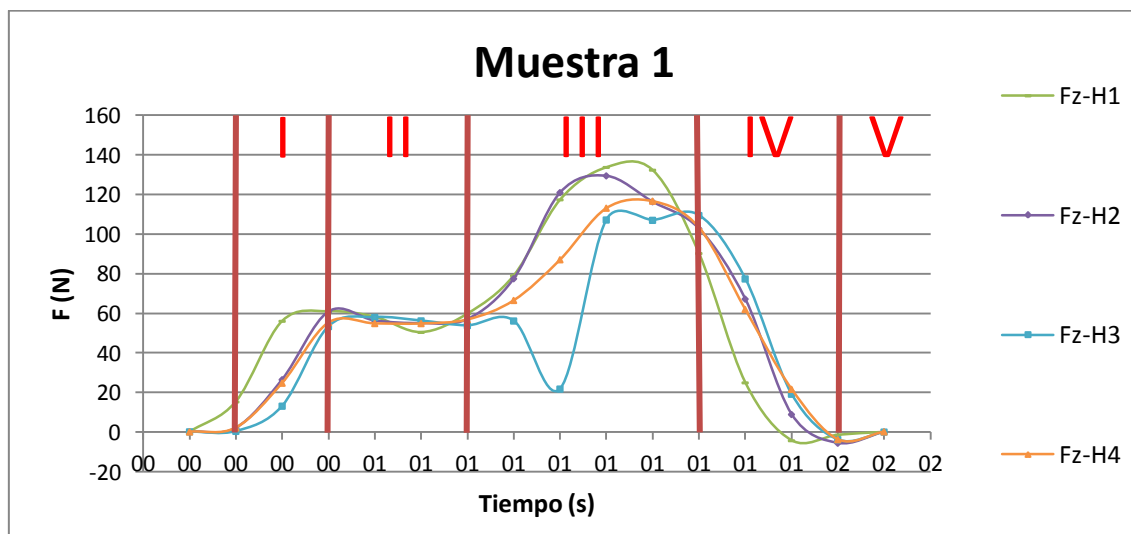


Figura 9: Muestra 1 - Áreas.

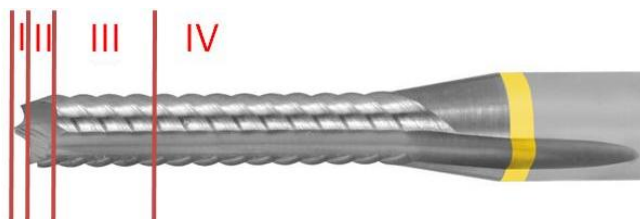


Figura 10: Áreas en la herramienta.

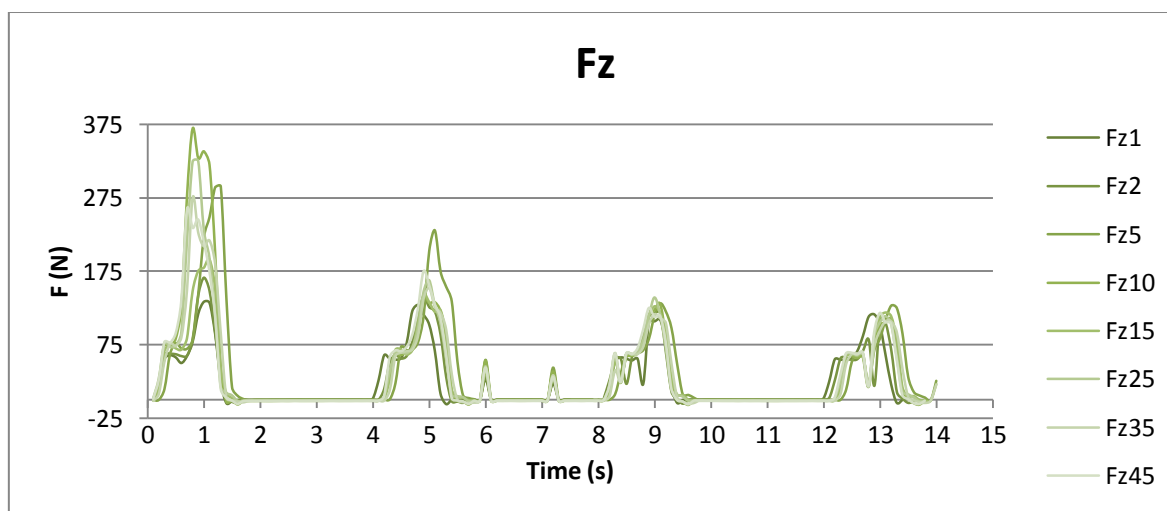
Por otra parte, los valores de las fuerzas en dirección x e y alcanzaron valores relativos bajos comparados con las de la dirección z aunque no siendo por ello despreciables. Se encontraron algunos valores elevados de fuerza debido a que las fibras se doblaban durante el proceso de mecanizado, pero no tuvieron una repercusión elevada sobre sus momentos/pares correspondientes. De igual manera se comprobó que hubiese concordancia entre la frecuencia teórica del proceso (97,2 Hz) y la obtenida durante los ensayos.

Posteriormente se analizó la evolución de la fuerza y par a lo largo de la mecanización de las cuarenta y cinco muestras (Fig. 12). Se detectó un aumento significativo de la fuerza requerida para el taladrado del primer agujero de cada muestra, el cual se debía al atascamiento de las virutas en la herramienta (Fig. 11).



Figura 11: Viruta adherida a la herramienta.

La escasa evacuación de la viruta debido a la geometría recta del flanco de la herramienta, junto con las altas temperaturas del proceso que provocan el ablandamiento de la matriz del polímero, resultaron en la adhesión de las virutas a la herramienta solidificándose en el tiempo necesario para el cambio de la muestra a mecanizar. La fuerza adicional necesaria para remover esta viruta adherida llegó a alcanzar valores de 130N (Fig. 12).

Figura 12: Evolución de F_z .

Respecto a la fuerza requerida para el segundo agujero se observó que era menor que la correspondiente al primero, pero superior que para el tercero y cuarto agujero. El motivo de ello es la baja capacidad de la herramienta para la evacuación de virutas junto con una carencia del sistema de aspiración de viruta, ya que dicho agujero se encontraba alejado de la boca de succión y junto a una superficie abierta. Ello resultó en el atascamiento de la herramienta y mayores fuerzas de compresión en la superficie de la muestra, obteniendo un mal acabado de la superficie (Fig. 13).

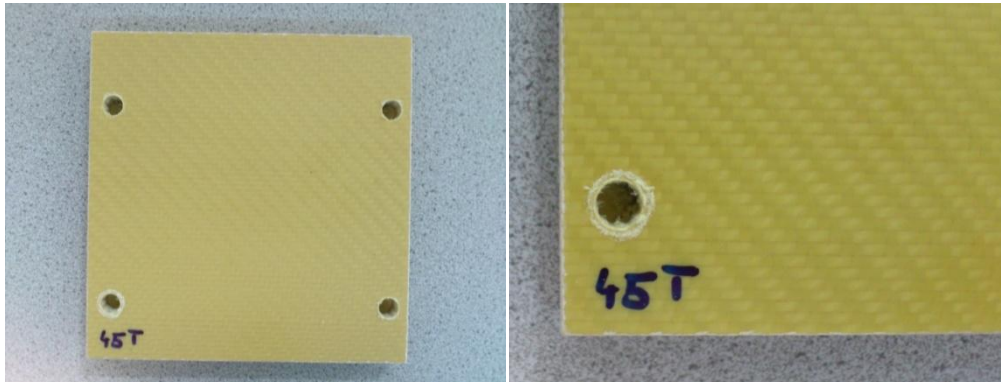


Figura 13: Acabado de la superficie del segundo taladro.

Las fuerzas requeridas para la mecanización del tercer y cuarto agujero permanecieron prácticamente constantes a lo largo de todos los ensayos. Por otra parte se detectaron fuerzas durante el movimiento a lo largo del eje x , cuando no se estaba mecanizando, las cuales podrían causar daños en el caso de realizar operaciones de fresado (véanse los segundos 6 y 7,2 en la Fig. 12).

Por último se analizó el desgaste de la herramienta. Para ello se analizaron las fuerzas requeridas para la mecanización de las cuarenta y cinco muestras, especialmente la primera y la última, así como la variación del radio de los filos de la herramienta (Tabla 4).

		Número de muestra								
		0	1	2	5	10	15	25	35	45
r [μm]	Filo principal	6.01	6.59	7.42	7.34	6.87	6.6	7.85	7.85	6.72
	Filo secundario	8.54	6.6	4.93	5.62	8.54	4.84	4.93	6.62	5.62

Tabla 4: Radio de los filos de la herramienta.

Se observó que los pares requeridos para la mecanización de la última muestra eran mayores en términos generales. De igual manera se observó que cuanto más afilado se encontraban los filos menor era la fuerza requerida, a excepción de la muestra treinta y cinco que no siguió dicha tendencia (Fig. 14). Para esta muestra la fuerza descendió mientras el radio se mantuvo constante, lo cual puede atribuirse a una variación en las propiedades de la muestra respecto a las otras.

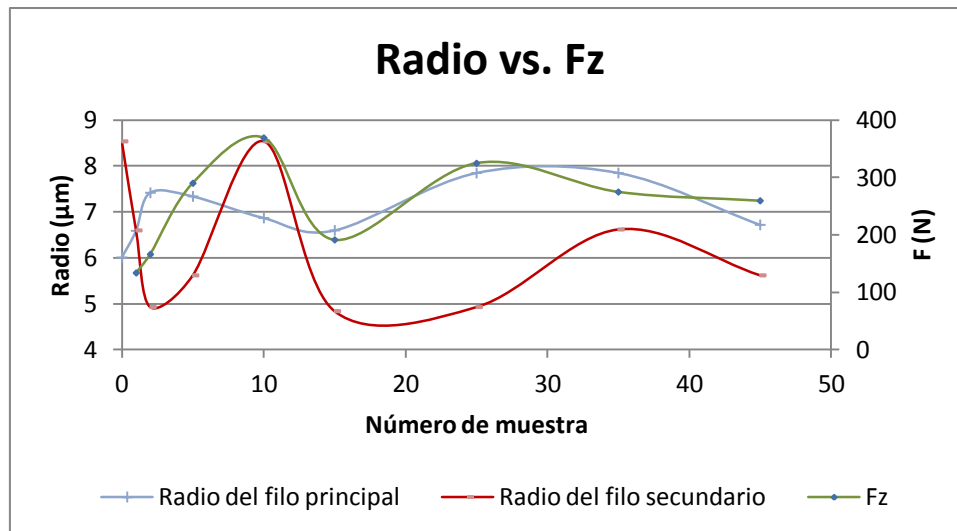


Figura 14: Radio vs. Fz.

Por otra parte se observó un mal acabado en los bordes de los agujeros, como era de esperar en la aramida, debido a que las fibras tienden a doblarse en vez de ser cortadas durante el mecanizado. Además se encontró delaminación de la lámina inferior en todas las muestras mecanizadas (Tabla 5).

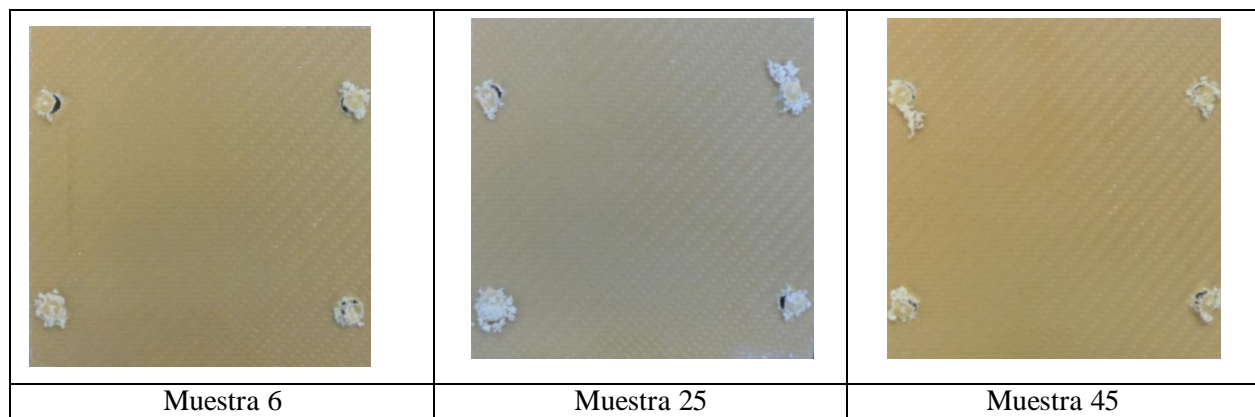


Tabla 5: Delaminación de la lámina inferior en las muestras 6, 25 y 45.

Finalmente, el efecto del desgaste sobre el acabado al mecanizar los materiales no pudo analizarse durante los ensayos, ya que no se encontraron niveles significativos de desgaste (Fig. 15) ni tendencia en ello, por lo que más ensayos deberían llevarse a cabo.

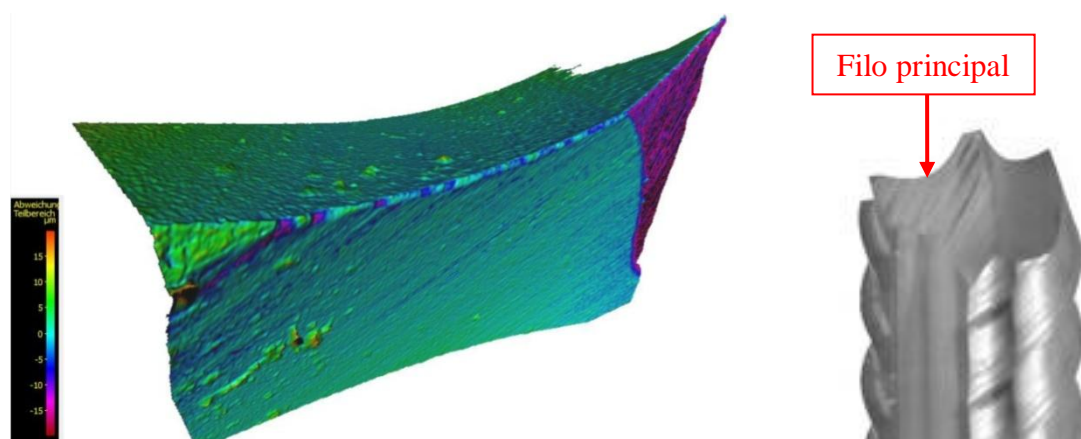


Figura 15: Comparación del desgaste del filo principal entre las muestras 1 y 45.